

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

**Разработка регулируемого четырехканального импульсного
понижающего преобразователя на базе микроконтроллера STM32F103**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки **2** курса **2233** группы

направления 03.04.03 «Радиофизика»

код и наименование направления

института физики

наименование института

Пухаревой Татьяны Андреевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

М.М. Слепченков

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

О.Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2021 г.

Введение

Понижающие преобразователи (stepdown, buck) стали неотъемлемой частью современной электроники. Они преобразуют входное нестабилизированное напряжение в меньшее стабилизируемое напряжение. Понижающие преобразователи передают со входа на выход небольшие порции энергии, используя ключ, диод, катушку индуктивности и несколько конденсаторов. Несмотря на то, что импульсные понижающие преобразователи (ИПН) по сравнению с линейными стабилизаторами, как правило, имеют большие размеры, они почти всегда обеспечивают лучший КПД. Производители ИПН, выполненные на основе аналогового ШИМ (широтно-импульсная модуляция) контроллера, часто приводят типовую схему включения, чтобы помочь инженерам быстро создать работающий прототип. Однако аналоговые ШИМ контроллеры в силу своей логики работы не способны обеспечить точное цифровое управление выходным напряжением. К тому же создание устройства, включающего в себя сразу несколько ИПН с одной цепью управления достаточно проблематично и экономически не выгодно. Решить данную задачу можно с помощью цифрового управления, реализованного на базе микроконтроллера. На сегодняшний день широкое распространение получили не дорогие 32-битные микроконтроллеры (МК) семейства STM32F103 с тактовой частотой 72 МГц. Данные микроконтроллеры обладают 64 кБ flash-памяти и 20 кБ оперативной памяти, что позволяет загружать в них достаточно большой объем кода. Данные МК оснащены четырьмя 16-битными таймерами (65536 значений) с возможностью широтно-импульсной модуляции. Также в МК присутствуют 12-битные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), с диапазоном входного напряжения от 0 до 3.3 В. Разрядность этих АЦП позволяет дискретизировать входной сигнал с шагом 0.805 мВ. Для сравнения, широко распространенный и популярный МК Atmega328P фирмы Atmel (ныне, Microchip) обладая

бОльшей стоимостью, имеет 10-битный АЦП (дискретизация 4.88 мВ за шаг) и 8-битные таймеры (256 значений).

На основе МК STM32F103CBT8, рассматриваемого в данной работе, можно сконструировать одноканальный ИПН, характеристики МК это позволяют. Однако при проектировании нескольких ИПН реализованных на базе МК STM32F103C8T8 в профильной литературе не уделено должного внимания режимам работы и электромагнитной совместимости (ЭМС) при одновременной работе.

Цель работы заключалась в разработка и в экспериментальном исследовании регулируемого четырехканального ИПН на базе микроконтроллера STM32F103C8T8 фирмы STMicroelectronics.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

- Освоение методики расчета и проектирования ИПН;
- Моделирование работы силового модуля ИПН в пакете spice-моделирования LTspice;
- Разработка принципиальной схемы устройства;
- Настройка периферии МК STM32F103 для управления силовыми модулями ИПН;
- Написание программы для работы МК с силовыми модулями;
- Проектирование и создание печатной платы устройства;
- Создание корпуса устройства;
- Анализ работы и исследование режимов.

Основное содержание работы

Симуляция работы силового модуля в Ltspice

Принципиальная схема силового блока преобразователя при симуляции в программе Ltspice показана на рисунке ниже.

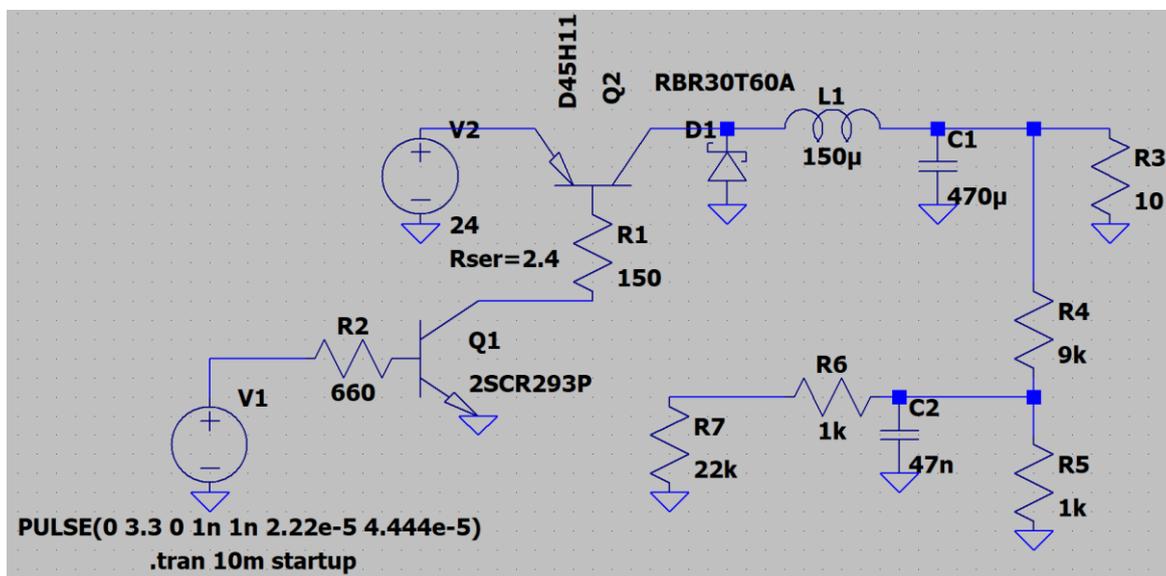


Рис. 1. Базовая схема понижающего преобразователя.

Источник V1 представляет собой эквивалент МК, генерирующего импульсы амплитудой 3.3 вольта. Транзистор Q1 является драйвером (усилителем) для управления мощным р-п-р транзистором Q2. Источником питания схемы служит источник с напряжением 24 вольта. Элементы V2, D1, L1 и C1 составляют силовую часть схемы, а элементы цепи R4 – R7 и C2 представляют собой делитель напряжения с НЧ фильтром для подключения к входу АЦП МК. Резистор R7 имитирует собой внутренний резистор входа АЦП.

На рисунках 3 - 9 представлены результаты симуляции одного из блоков.

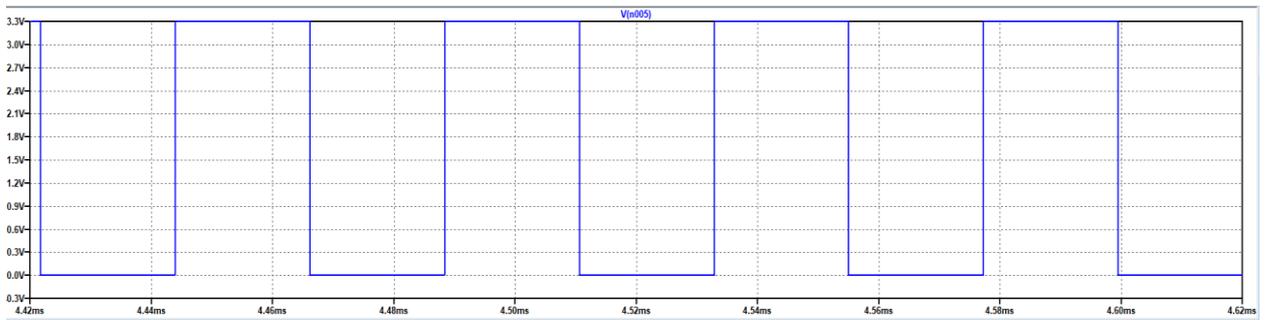


Рис. 2. Выходные импульсы таймера

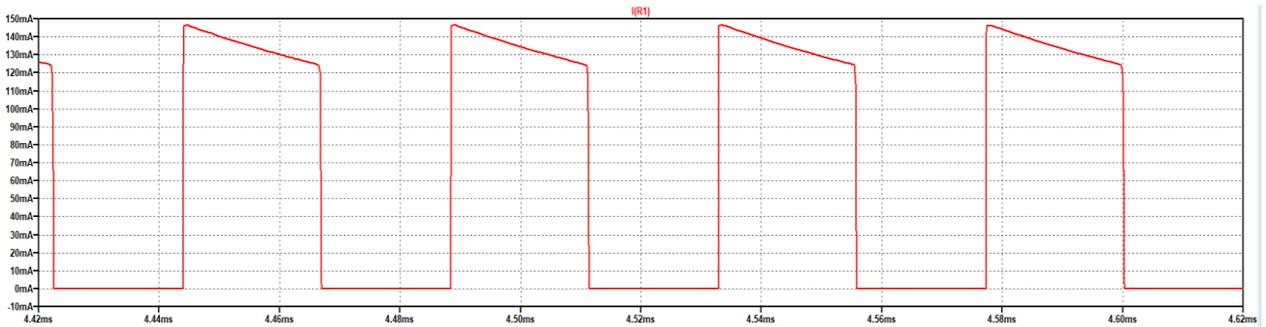


Рис. 3. Управляющий ток базы транзистора Q2.

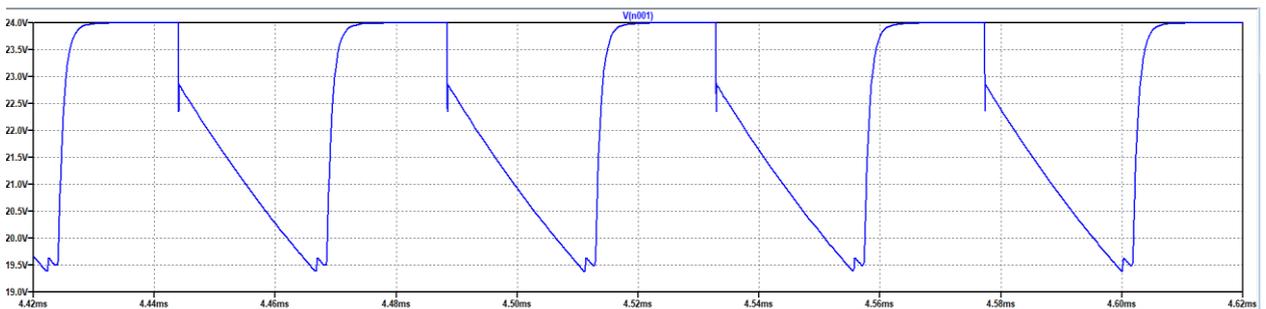


Рис. 4. «Просадка» напряжения источника питания при работе ИПП.

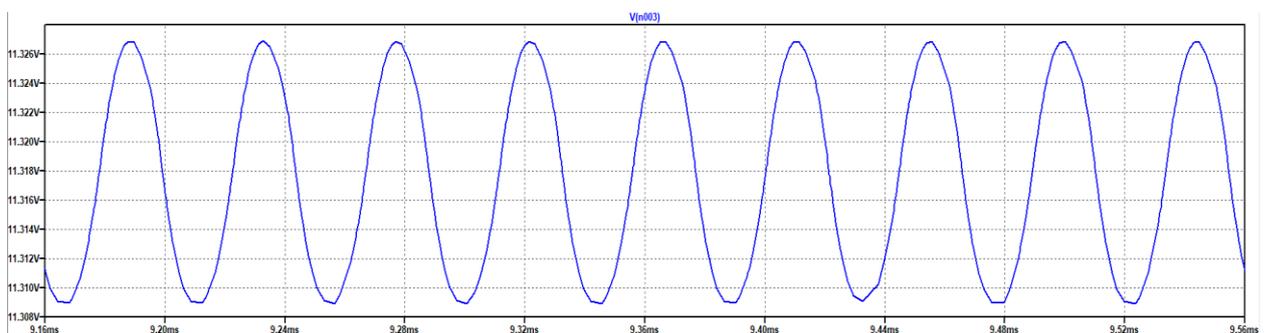


Рис. 5. Пульсации выходного напряжения

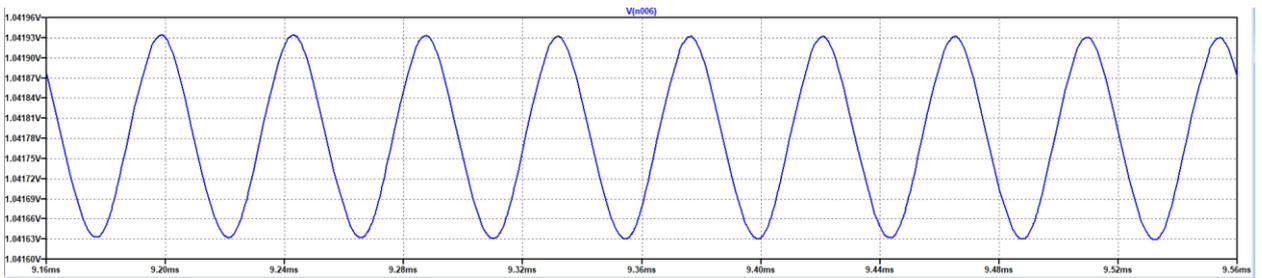


Рис. 6. Пульсации на резисторе R7, имитирующий вход АЦП.

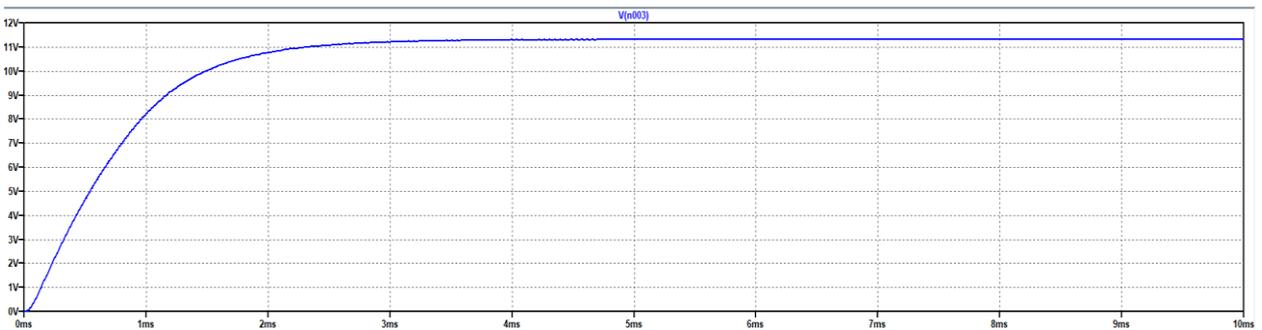


Рис. 7. Общий вид выходного напряжения.

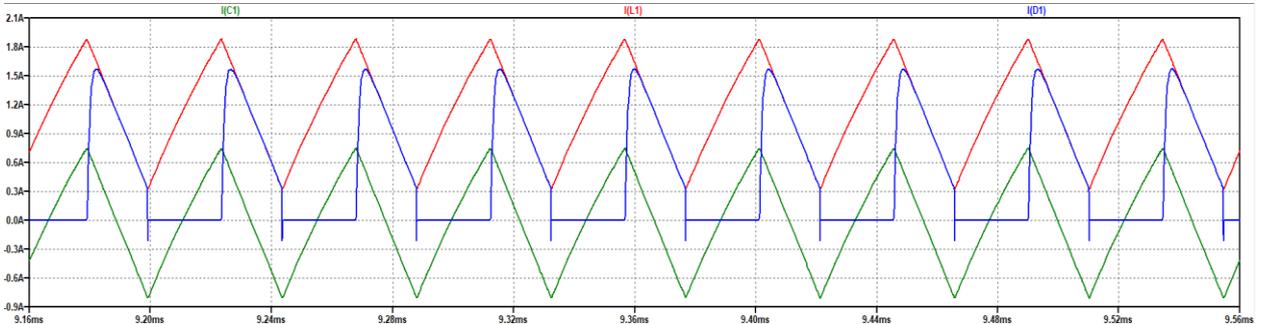


Рис.8. Токи в силовых цепях схемы.

На рисунке 4 наблюдается падение напряжения до 4.5 В на внутреннем сопротивлении источника. При этом выходное напряжение колеблется в пределах 17 мВ (см. рис.5), что показывает стабилизирующие свойства ИПП. Амплитуда пульсаций напряжения не превышает 0.3 мВ – это достигается благодаря НЧ фильтру. Необходимость такой стабилизации обусловлена тем, что это напряжение будет поступать на вход АЦП, и чем «чище» будет сигнал, тем точнее МК будет стабилизировать и регулировать выходное напряжение. Рисунок 8 иллюстрирует токи в силовых ветвях ИПП. Красным цветом

Управление преобразователем осуществляется тремя тактовыми кнопками и 32-х символьным LCD дисплеем (LCD1602), осуществляющий вывод на экран выходного напряжения каждого ИПП блока. В процессе работы МК осуществляет одновременное управление четырьмя блоками ИПП, а также выполняет функцию четырехканального вольтметра. Стоит отметить, что в разрабатываемом преобразователе реализуется независимое управление каждым из ИПП в отдельности, однако, как видно из принципиальной схемы рисунка 10, все блоки связаны общим проводом Gnd. Рассмотрим принцип работы преобразователя на примере блока #1 (обведен красной рамкой на рисунке 10): с вывода PA15 таймера МК прямоугольные импульсы через резистор 660 Ом поступают на вход транзистора Q1, тем самым открывая его. Нагрузкой транзистора Q1 служит резистор номиналом 150 Ом и переход база – эмиттер транзистора Q2. При открытии Q1 (с МК поступила логическая «1») транзистор Q2 так же открывается и в цепи коллектор – эмиттер транзистора Q2 начинает течь ток. Этот ток проходит через катушку L1, заряжает конденсатор и питает нагрузку (на схеме не указан). Через диод D1 ток течь не может, потому как на его катоде положительный потенциал. При закрытии Q1 (с МК поступил логический «0») закрывается и Q2, но ток в цепи нагрузки не прекращается и поддерживается энергией конденсатора и катушки индуктивности, в которой при протекании через нее тока запасалась энергия. В дальнейшем цикл повторяется. Уровень выходного напряжения выставляется путем изменения скважности импульсов с вывода таймера (пин PA15), МК за счет обратной связи организованной цепью R4 – R7, осуществляет контроль выходного напряжения ИПП блока, путем передачи одной десятой части выходного напряжения на вход АЦП (вывод PA0). Если значение выходного напряжения отличается от заданного пользователем, то МК попытается стабилизировать его до заданного уровня путем изменения скважности импульсов таймера. Одновременно с этим, МК с периодом 250 мс выводит значение выходного напряжения каждого ИПП блока на LCD дисплей и в реальном времени ожидает от пользователя команд от нажатия

тактовых кнопок «SELECT», «UP VOLTAGE», «DOWN VOLTAGE». Дисплей с МК связывается с помощью I2C – интерфейса (выводы SDA, SCL).

В ходе экспериментов было выяснено, что оптимальная частота работы ШИМ всех четырех блоков составляет 22.5 кГц. Выбор такой частоты обусловлен зависимостью частоты таймеров от предделителя значение которого задает точность регулировки выходного напряжения. Для примера возьмем три случая частоты ШИМ, которые были рассмотрены в ходе экспериментов. В первом случае, частота составляла 72 кГц, что в тысячу раз меньше тактовой частоты МК. В этом случае изменение ШИМ (скважности импульсов) возможно в пределах от 0 до 1000 значений:

$$\frac{72\,000\,000\text{ Гц}}{72\,000\text{ Гц}} = 1000.$$

На данной частоте возникало ухудшение стабилизации при выходном напряжении менее 6 В. Так как значение скважности меняется дискретно, то при таком разбиении регулировки ШИМ-у не хватало точности. Следующим вариантом была установка частоты в 36 кГц, в этом случае скважность менялась в пределах от 0 до 2000 значений.

$$\frac{72\,000\,000\text{ Гц}}{36\,000\text{ Гц}} = 2000.$$

Здесь ситуация улучшилась, но при установке выходного напряжения ниже 3.5 вольт также наблюдалось ухудшение стабилизации. В итоге, оптимальным вариантом частоты ШИМ была выбрана частота 22.5 кГц – здесь шаг регулировки скважности составляет уже 3200 значений.

$$\frac{72\,000\,000\text{ Гц}}{22\,500\text{ Гц}} = 3200.$$

При такой точности регулировки устройство поддерживало стабильность выходного напряжения вплоть до 1 вольта. Нужно отметить, что частота 22.5 кГц лежит вне звукового диапазона, и тем самым устройство не

будет издавать слышимые звуки при работе. Также в ходе эксперимента было выяснено, что для нормальной работы четырех блоков ИПП необходимо настраивать каждый блок на одну частоту коммутации (в данном случае 22.5 кГц). При несоблюдении этого требования возникает проблема электромагнитной совместимости, и устройство теряет стабильность при работе.

Конструкция четырехканального ИПП

На рисунке ниже представлена печатная плата разработанного устройства.



Рис. 10. Печатная плата и собранное устройства регулируемого преобразователя на базе МК STM32F103CBT8.

Итоговым тестом работы устройства является измерение КПД при различных частотах ШИМ-а МК. В работе исследовались четыре варианта частот ШИМ сигнала: 24 кГц, 36 кГц, 48 кГц и 72 кГц. В МК существует прямая зависимость между частотой таймера и дискретизацией ШИМ-а. То есть, чем выше частота таймера, тем меньше дискретизацией ШИМ. Малая дискретизация ШИМ ведет к худшей стабильности выходного напряжения, но уменьшает значение выходной емкости и индуктивность катушки. В свою очередь, уменьшение частоты таймера уменьшает динамические потери в силовых ключах и выходных диодах, а также повышает стабильность выходного напряжения устройства.

Ниже на рисунке приведены кривые КПД для различных частот ШИМ.

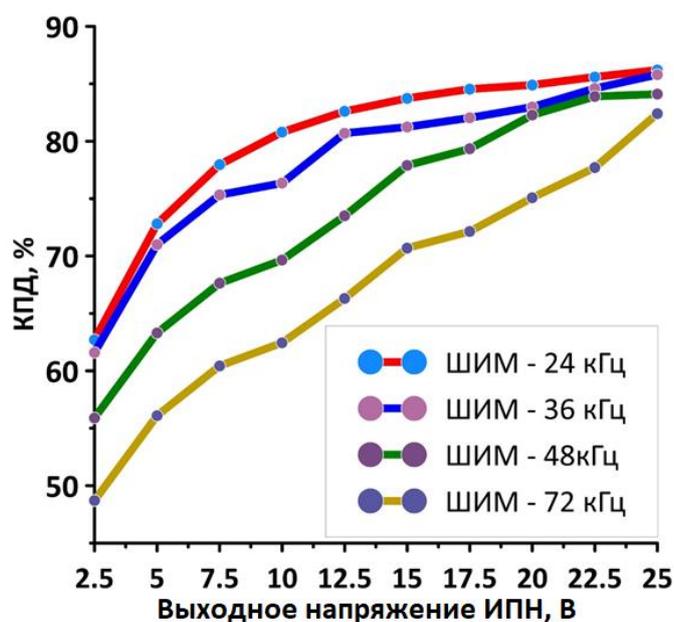


Рис. 11. КПД устройства при различных частотах ШИМ.

Как видно из рисунка, с увеличением частоты ШИМ-а КПД устройства падает, так как начинают сказываться динамические потери в силовых элементах. В целом, при уменьшении выходного напряжения, для всех четырех случаев, эффективность устройства уменьшается – это связано с тем, что в силовых модулях применен биполярный р-п-р транзистор, и с уменьшением выходного напряжения его напряжение насыщения уже сравнимо с выходным напряжением ИПН.

Заключение

В данной работе проводилась разработка и экспериментальное исследование регулируемого четырехканального ИПН на базе микроконтроллера STM32F103C8T8 фирмы STMicroelectronics. В результате решались следующие задачи:

- Освоение методики расчета и проектирования ИПН;
- Моделирование работы силового модуля ИПН в пакете spice-моделирования LTspice;

- Разработка принципиальной схемы устройства;
- Настройка периферии МК STM32F103 для управления силовыми модулями ИПН;
- Написание программы для работы МК с силовыми модулями;
- Проектирование и создание печатной платы устройства;
- Создание корпуса устройства;
- Анализ работы и исследование режимов.

На основании полученных результатов можно заключить, что КПД спроектированного устройства показывает наилучшие значения на частоте 24 кГц. Так как в этом режиме возникают наименьшие динамические потери в транзисторе из всех рассмотренных 4-х случаев. При дальнейшем уменьшении частоты устройство выйдет в звуковой диапазон и будет создавать лишний шум при работе, а также вызовет увеличение необходимого значения индуктивности в катушке и емкости выходного конденсатора.

Так же в работе выявлено, что не допускается работа устройства при разных частотах в силовых модулях, так как это вызывает нестабильную работу устройства и ухудшение стабилизирующих свойств ИПН – возникает проблема электромагнитной совместимости.